

DOI: 10.5846/stxb202101070069

汤娜, 王志泰, 包玉, 陈信同, 马星宇, 韦光富. 城市基质对城市遗存自然山体植物群落物种多样性的影响——以贵阳市为例. 生态学报, 2022, 42(15): 6320-6334.

Tang N, Wang Z T, Bao Y, Chen X T, Ma X Y, Wei G F. Exploring the relationship between the plant diversity of the urban remnant mountains and its surrounding urban matrix characteristics: A case study of Guiyang City. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6320-6334.

# 城市基质对城市遗存自然山体植物群落物种多样性的影响

## ——以贵阳市为例

汤 娜<sup>1</sup>, 王志泰<sup>1,2</sup>, 包 玉<sup>1,2,\*</sup>, 陈信同<sup>1</sup>, 马星宇<sup>1</sup>, 韦光富<sup>1</sup>

1 贵州大学林学院, 贵阳 550025

2 贵州大学风景园林规划设计研究中心, 贵阳 550025

**摘要:** 多山地区城市扩展过程中, 建成区内遗存有大量自然山体, 形成城市人工基质“海”中的遗存山体“岛屿生境”, 这些城市遗存山体长期受到来自城市人工环境的各种间接或直接的干扰。为探索城市基质与城市遗存自然山体植物群落多样性之间的关系, 以黔中地区典型的喀斯特多山城市——贵阳为研究区域, 按不同规模选择 15 座城市遗存山体, 每座样山按坡向+坡位组合方式设置群落调查样地, 共设置 143 个样地; 以样山边界为基准, 100 m 为步长向外设置 20 个缓冲区, 总宽度为 2000 m, 计算缓冲区总不透水表面积 (PTIA)、植被覆盖度 (VC)、破碎化指数 (FI)、土地利用 (LU) 4 个城市基质特征指标。运用 Pearson 相关分析和线性回归模型分析了城市基质特征指标与城市遗存山体植物群落物种多样性之间的相关关系。结果表明: ① PTIA 对不同规模城市遗存山体整体植物多样性的影响都存在明显空间尺度效应, 在 2000 m 时相关性最高, 呈显著正相关; 不同规模城市遗存山体整体植物多样性与单个或多个 LU 类型存在显著相关性, 但影响效应存在显著差异; VC、FI 与城市遗存山体整体植物多样性无显著相关关系; ② 不同规模城市遗存山体各层次植物多样性与城市基质特征 4 个指标在不同的空间尺度上均存在显著相关性; ③ 城市遗存山体植物多样性 Shannon-Wiener 指数 ( $H'$ ) 与每个城市基质特征指标一元线性回归拟合度高, 而多元回归  $R^2$  为 0。探明城市基质特征对城市遗存山体植物多样性具有一定的影响, 但影响规律不一致且存在空间尺度差异, 说明城市人工环境对城市遗存山体植物多样性维持的影响非常复杂, 需要从不同的角度开展深入的研究, 才有可能揭示城市遗存山体植物多样性的城市化响应机制, 进而指导城市遗存山体保护规划与管理。

**关键词:** 城市遗存山体; 植物多样性; 城市基质; 相关性分析; 多山城市

## Exploring the relationship between the plant diversity of the urban remnant mountains and its surrounding urban matrix characteristics: A case study of Guiyang City

TANG Na<sup>1</sup>, WANG Zhitai<sup>1,2</sup>, BAO Yu<sup>1,2,\*</sup>, CHEN Xintong<sup>1</sup>, MA Xingyu<sup>1</sup>, WEI Guangfu<sup>1</sup>

1 College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2 Research Center for Landscape Architecture Planning and Design of Guizhou University, Guiyang 550025, China

**Abstract:** In the process of urban expansion in mountainous areas, there are a large number of natural mountains remained in the urban built-up area, forming the urban remnant mountain “island habitat” in the urban artificial matrix “sea”. These

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (32060367); 贵州省科学技术基金重点项目 (黔科合基础 [2020] 1Z011); 贵州省科技支撑项目 (黔科合支撑 [2021] 一般 458)

收稿日期: 2021-01-07; 网络出版日期: 2022-04-07

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ybao@gzu.edu.cn

urban remnant mountains (URMs) have long been affected by a variety of indirect or direct interference from the urban artificial environment. To explore the relationship between the plant diversity of the URMs and its surrounding urban matrix characteristics, taking the urban built-up area of Guiyang, a typical karst mountainous city in central Guizhou, as the research area, fifteen URMs were selected according to different sizes as research objects in this study. The sample spots of each URM were set by the combination way of slope direction and slope position. A total of 143 plant diversity survey plots were set up on the fifteen URMs. Taking the edge line of sample URMs as datum, buffer zones were set successively outward at step lengths of 100 m and 20 buffer zones were set with a total width of 2000 m. The proportion of total impervious surface area (PTIA), vegetation coverage (VC), fragmentation index (FI) and land use (LU) of each zone were calculated. The correlation between the urban matrix characteristic indices and the species diversity indices of the URMs plant communities was analyzed using the Pearson correlation analysis and the linear regression model. The results showed that: (i) the influence of PTIA on the overall plant diversity of different size URMs had obviously spatial scale effects, with the highest correlation and significantly positive correlation at 2000 m; The overall plant diversity of different size URMs were significantly associated with a single or multiple LU types, but the impact effects were significantly different; There was no significant relationship between VC and FI and the overall plant diversity of URMs. (ii) The plant diversity indices of all plant levels of different size URMs were correlated with the four indices of urban matrix characteristics at different spatial scales. (iii) The Shannon-Wiener index ( $H'$ ) had a high linear regression fit to each urban matrix index, however the multiple regression  $R^2$  was 0. In this study, it was explored that the urban matrix characteristics had some influence on the plant diversity of URMs in different scales, but the influence laws were inconsistent. It shows that the impact of urban artificial environment on the maintenance of plant diversity of URMs is very complex. It is very necessary to conduct in-depth research from different perspectives to reveal the urbanization response mechanism of plant diversity of URMs, and then guide the protection planning and management of URMs.

**Key Words:** urban remnant mountains; plant diversity; urban matrix; correlation analysis; multi-mountain city

随着全球城市化与城市人口的急剧增长,许多城市正在经历大规模的土地利用转换<sup>[1]</sup>。城市地区不断向边界外的(近)自然区域扩张,大量(近)自然区域迅速丧失、分裂、退化<sup>[2]</sup>,或是分散并镶嵌在异质的人工建成环境中形成岛屿或类岛屿状的孤立“残余生境”<sup>[3-4]</sup>。多数地区城市扩张对(近)自然生境的破坏是丧失式的(即完全转换为人工建设环境),极少有城市能够在城市化过程中保留这些(近)自然生境<sup>[5]</sup>。由于城市化地区原本完整的生境斑块由自然土地覆盖逐渐转换为不透水表面而导致的栖息地丧失与破碎化“过程”对植物群落物种多样性的影响通常很大且为负效应<sup>[6-7]</sup>。因此,城市化也被认为是城市生物多样性丧失的主要原因,并严重威胁到城市生物多样性保护<sup>[8]</sup>。城市残余生境是城市中珍贵的生态资源与重要的物种多样性潜在保护核心区域<sup>[9-11]</sup>,能够维持城市生物多样性和多种生态系统过程并为城市居民提供生态福祉<sup>[4,12]</sup>。由于城市人工环境的复杂性,城市残余生境物种多样性维持机理研究是当前世界范围内城市生态学的热点与难点问题<sup>[13]</sup>,引起了城市生态学界的广泛关注<sup>[14-15]</sup>。

目前已有部分案例研究采用一些城市化指标作为城市生物多样性的潜在驱动因素。例如,Yan 等人<sup>[4]</sup>在中国武汉城市植物多样性研究中表明,城市不透水表面积是有效衡量城市植物多样性的重要指标,当城市不透水表面积占比超过 40%时,城市植物多样性急剧下降;Hayriye 等人<sup>[2]</sup>采用时间序列与基质效用、隔离性、连通性 3 个指标分析了美国亚利桑那州凤凰城都市区城市化进程的加快对开放空间保护的影响,结果表明,与保护区相邻的土地利用强度的增加可能会增加边缘效应,降低内部或核心生境区域的生境价值;Ramalho 等人<sup>[13]</sup>评估了澳大利亚珀斯市城市破碎化对 30 个 *Banksia* 残余生境植物物种丰富度的影响,结果表明,城市景观快速破碎化对残余植被的影响较大且复杂,并且这些影响可能需要几十年才能呈现出显著关系;Fahrig 等人<sup>[6]</sup>研究也表明,多种机制可能导致对生境破碎化的正面或负面景观尺度响应,并且可能随环境变化而发

生改变。在非洲、欧洲、亚洲一些城市化对植物群落物种多样性的影响研究也证实,斑块规模与相邻土地利用类型是决定植物群落物种组成与丰富度的重要因素,但因干扰机制与周围环境变化的直接或间接影响可能会有所不同<sup>[11-12,14]</sup>。

城市残余生境的特殊性在于它完全暴露在异质的城市人工建成基质环境中,与周边环境无论是物质交换还是空间关系都较为复杂,尤其是不同景观类型之间的相互影响与作用、以及景观结构和功能的变化对残余生境的影响都是复杂多样的<sup>[15-16]</sup>。以往多数研究采用“梯度法”探寻距离城市中心的距离、人口密度等城市因素如何影响城市基质内的生物多样性<sup>[17]</sup>。但也有学者表明城市生物多样性格局(鸟类和植物)受城市居民文化和经济状况的影响,而不受人口密度、距离城市中心距离或干扰后时间的影响<sup>[18-20]</sup>,因为城市化梯度可以作为干扰状态、污染物负荷或捕食压力等因果机制的替代物,但它却不会直接影响生物多样性。城市残余生境生物多样性更大程度上取决于不同城市化梯度残余生境相邻斑块特征、景观破碎化、土地利用组成与结构变化的差异<sup>[17]</sup>。尽管如此,目前城市基质环境组成与配置对残余生境植物多样性与各层次植物多样性的作用范围与机制仍然不清楚。

以贵州高原为中心的中国南方岩溶地区,是全球喀斯特发育最典型、最复杂、景观类型最丰富的一个片区,也是面积最大、最集中的生态脆弱区<sup>[21]</sup>。以孤峰和峰林为主的特殊地貌形态,使得该区域城市扩展过程中大量规模不等的喀斯特山丘以岛屿或类岛屿状的(半)自然残余生境遗留在异质城市人工建成环境中,形成了喀斯特“城市遗存山体”(Urban Remnant Mountains, URM)s生境。“城在山间,山在城中”城山镶嵌的喀斯特山地城市空间形态既造就了独特的城市风貌,又形成了喀斯特多山城市珍贵的城市山体残余生境资源<sup>[22]</sup>。为城市人工环境下的残余生境生态学研究提供了理想的研究场所。贵阳市位于贵州省中部,是典型的喀斯特多山城市,中心城区建成区内有大量城市遗存山体。本研究以贵阳市城市建成区 15 个城市遗存山体为研究对象,通过群落调查,测算各山体不同植物层次  $\alpha$  多样性指数,采用不透水表面占比(PTIA)、植被覆盖度(VC)、景观破碎度(FI)、土地利用(LU)4个城市基质特征指标,探索城市基质特征与城市遗存山体植物多样性之间的相关关系。旨在为喀斯特山地城市景观格局与生物多样性的关系研究提供理论基础,并为喀斯特山地城市合理划定城镇空间和生态空间边界,科学构建城镇化推进格局,维护生物多样性,保障区域生态安全,推进生态文明城市建设,提供重要的科学依据和理论支撑。

## 1 研究区与研究方法

### 1.1 研究区概况

本研究以贵阳市中心城区建成区(106°07′—107°17′E, 26°11′—26°55′N)为研究区,其位于黔中岩溶区域腹地,地处云贵高原黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带,地貌属于以喀斯特孤峰、和峰林为主的岩溶丘原盆地地区<sup>[21]</sup>。境内地带性植被为中亚热带湿润性常绿阔叶林,历史上植物资源极为丰富<sup>[23]</sup>。20 世纪 80 年代,城市扩张受到封闭岩溶盆地地形影响,以及经济发展落后和建设水平低的制约,中心城区建成区总面积仅 22.19 km<sup>2</sup>,至 2018 年,贵阳市中心城区建成区总面积达 368.39 km<sup>2</sup>,30 年间建成区面积增长了 16.6 倍。据统计 2018 年常住人口为 488.19 万。建成区内的遗存山体生境多以小面积、破碎化、孤立的形式分散在异质城市基质环境中。实际上,大多数城市遗存山体被包围入城时还保留较大的斑块面积,城市内部致密化逐渐向遗存山体逼近,城市遗存山体被侵占、分割成小斑块或完全吞噬,这个过程至今仍未停止。与此同时,城市遗存山体很少甚至没有受到任何保护与管理,斑块数量与面积正在急剧减少,生态环境脆弱并且具有明显的空间异质性<sup>[24]</sup>。

### 1.2 基础数据源

获取研究区 2018 年 Pleiades 高分辨率卫星影像图(0.5 m 空间分辨率),通过图像加强、几何校正和地图投影等预处理,基于 ArcGIS 软件平台,根据《土地利用现状分类(GB/T21010—2017)》,通过目视解译结合相关规划资料和野外调查验证的方法,将景观类型分为建设用地和非建设用地两大类。建设用地分为居住用地

(R)、公共管理与公共服务用地(A)、商业服务设施用地(B)、工业用地(M)、物流仓储用地(W)、交通设施用地(S)、公共设施用地(U)和绿地(G)8类,非建设用地分为耕地(E21)、林地(E22)、草地(E31)、水域(E1)、城市遗存山体(URM)和未利用地(E32)6类,建立研究区空间属性数据库。

1.3 样山选择、样地设置与植物群落调查

将建成区遗存山体按规模分为3个类型:大型( $\geq 10\text{ hm}^2$ )、中型( $3\text{--}10\text{ hm}^2$ )和小型( $\leq 3\text{ hm}^2$ ),每一类型中随机选择遗存山体5座,共15座城市遗存山体做为研究对象(表1)。样地设置按四方向法(东南西北),以山顶为中心向山脚延伸,大型与中型城市遗存山体每方向3个样地,小型城市遗存山体每方向2个样地,样地面积均为 $30\text{ m}\times 30\text{ m}$ ,共143个调查样地。每个样地按:乔( $10\text{ m}\times 10\text{ m}$ )、灌( $3\text{ m}\times 3\text{ m}$ )、草( $1\text{ m}\times 1\text{ m}$ )分别设置5个调查样方,每个样方之间的间隔不少于 $3\text{--}5\text{ m}$ ,样方为嵌套型。野外调查时间为2019年7—10月与2020年7—10月,记录每个样方乔木的种名、数量、高度、胸径、冠幅等;灌木(包括小乔木)的种名、高度、冠径、株数等;草本的种名、株数和盖度。调查结果在Excel软件中构建植物相关信息和群落特征数据库。由于城市遗存山体受到城市持续不断的人为干扰时,不同层次植物对干扰的响应可能是不同的。因此,在整体植物多样性与各层次植物多样性(乔木、灌木、草本(含藤本))上分别计算了4种物种多样性指数:Shannon-Wiener指数( $H'$ )、Margalef物种丰富度指数( $R$ )、Simpson指数( $D$ )、Pielou指数( $J_h$ )<sup>[25]</sup>。参考中国植物科学数据中心(<https://www.plantplus.cn/cn>)与《贵州植物志》对乡土物种进行划分。

表1 城市遗存山体样本山体基本信息表

Table 1 The basic information table of URHs in Guiyang city

| 编号<br>Number | 面积<br>Area/hm <sup>2</sup> | 所在区<br>District | 编号<br>Number | 面积<br>Area/hm <sup>2</sup> | 所在区<br>District | 编号<br>Number | 面积<br>Area/hm <sup>2</sup> | 所在区<br>District |
|--------------|----------------------------|-----------------|--------------|----------------------------|-----------------|--------------|----------------------------|-----------------|
| L1           | 10.19                      | 南明区             | M1           | 4.05                       | 乌当区             | S1           | 1.86                       | 白云区             |
| L2           | 10.52                      | 观山湖区            | M2           | 4.36                       | 云岩区             | S2           | 2.57                       | 乌当区             |
| L3           | 11.23                      | 云岩区             | M3           | 5.59                       | 南明区             | S3           | 1.85                       | 南明区             |
| L4           | 14.01                      | 南明区             | M4           | 4.99                       | 花溪区             | S4           | 2.89                       | 花溪区             |
| L5           | 17.40                      | 花溪区             | M5           | 3.83                       | 乌当区             | S5           | 1.46                       | 白云区             |

L:大型山体 Large mountain; M:中型山体 Medium mountain; S:小型山体 Small mountain

1.4 缓冲区设置与城市基质特征指标

运用Arcgis10.2的Multiple Ring Buffer工具,以15座样本山体的山脚线为基准线,按100 m步长向外等距扩展缓冲区,生成了步长为100 m的20个缓冲区(总宽度2000 m),采用递增累加的计算方式对每座城市遗存山体的20个缓冲区内的城市基质特征指标进行测算。

本研究采用不透水面积占比(PTIA)、植物覆盖度(VC)、景观破碎度(FI)和土地利用(LU)4个城市基质特征指标,解释城市基质组成与结构复杂性对城市遗存山体植物群落物种多样性的潜在影响<sup>[2,26–27]</sup>。计算方式如下:

$$PTIA = \text{缓冲区总不透水面积} / \text{缓冲区总面积} \times 100\% \quad (1)$$

式中,缓冲区总不透水表面积是指R、A、B、M、W、S、U 7类土地用地面积之和;总面积是指缓冲区内所有用地类型面积之和。

$$VC = (\text{缓冲区植被覆盖总面积} / \text{缓冲区总面积}) \times 100\% \quad (2)$$

式中,缓冲区植被覆盖总面积是指G、E21、E22、E31、E1、URM 6类土地利用之和。

$$FI = \frac{P_i}{S_i} \quad (3)$$

式中, $P_i$ 为缓冲区*i*的斑块数, $S_i$ 为缓冲区*i*的总面积。

土地利用类型可以体现人类活动干扰的强度和方式,而土地利用的方式对城市植被的分布具有强烈的影响<sup>[28]</sup>。该指标主要是通过测算缓冲区范围内的各类土地利用类型面积占比,分析各类土地利用与城市遗存

山体植物群落物种多样性的潜在关系。计算方式如下:

$$LU = (BZT_{L_{ii}}/BA) \times 100\% \quad (4)$$

式中,  $LU$  为土地利用, 缓冲区土地利用类型总面积 ( $BZT_{L_{ii}}$ ) 是指第  $i$  种土地利用类型在缓冲区范围内的总面积, 总面积 ( $BA$ ) 是指缓冲区内所有用地类型面积之和。

### 1.5 数据处理

采用 Pearson 相关性分析检测城市遗存山体不同层次植物多样性指数与 4 个城市基质特征指标之间的相关关系; 各变量间进行共线性检验后, 构建城市遗存山体植物多样性指数与城市基质特征指标之间多元线性回归模型; 分别比较了 4 个城市基质特征指标对城市遗存山体的整体植物多样性和各层次植物多样性的显著程度与相互关系。试图找到最适合解释喀斯特山地城市城市遗存山体植物多样的城市基质特征因素与影响尺度范围。所有处理均在 SPSS 19.0 和 Excel 2010 两个软件中进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 城市遗存山体植物群落物种组成与结构及多样性

15 座样本山体的 143 个样地调查共记录植物 581 种隶属于 150 科 456 属, 乡土与外来物种分别为 354 和 227 种。其中, 大型遗存山体记录植物 347 种隶属于 112 科 295 属, 乡土与外来物种分别为 220 和 127 种; 中型遗存山体记录植物 333 种隶属于 105 科 279 属, 乡土与外来物种分别为 226 和 107 种; 小规模遗存山体记录植物 383 种隶属于 128 科 308 属, 乡土与外来物种分别为 238 和 145 种。3 个规模类型城市遗存山体植物科、属、种与乡土、外来物种的平均物种数量无显著性差异; 乔木、藤本、草本平均物种数也无明显差异; 仅灌木层存在显著差异, 表现为随山体规模增加而减少: 小型 (35) > 中型 (32) > 大型 (25) (图 1)。

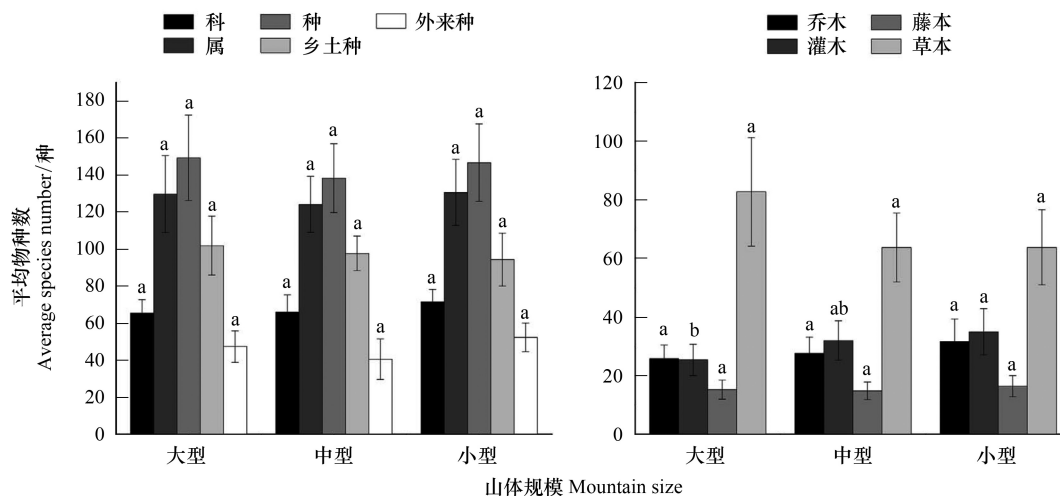


图 1 不同规模城市遗存山体植物物种组成与多层次植物物种数分布图

Fig.1 Distribution diagram of species composition and the number of each level plant species of different size urban remnant mountains (URMs)

图中同一指标的相同字母表示无显著差异 ( $P < 0.05$ )、不同字母表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

3 个规模类型的城市遗存山体整体植物多样性存在显著性差异, 表现为中型 > 小型 > 大型; 各层次植物多样性也存在显著性差异, 乔木层、草本层多样性呈现出大型 > 中型 > 小型的趋势; 灌木层多样性呈现出小型 > 中型 > 大型的趋势 (图 2)。

### 2.2 城市基质特征对城市遗存山体植物多样性的影响

#### 2.2.1 不透水表面占比 (PTIA) 对遗存山体整体植物多样性与多层次植物多样性的影响

不同规模城市遗存山体整体植物多样性与周围缓冲区 PTIA 的相关关系均存在明显的空间尺度效应。

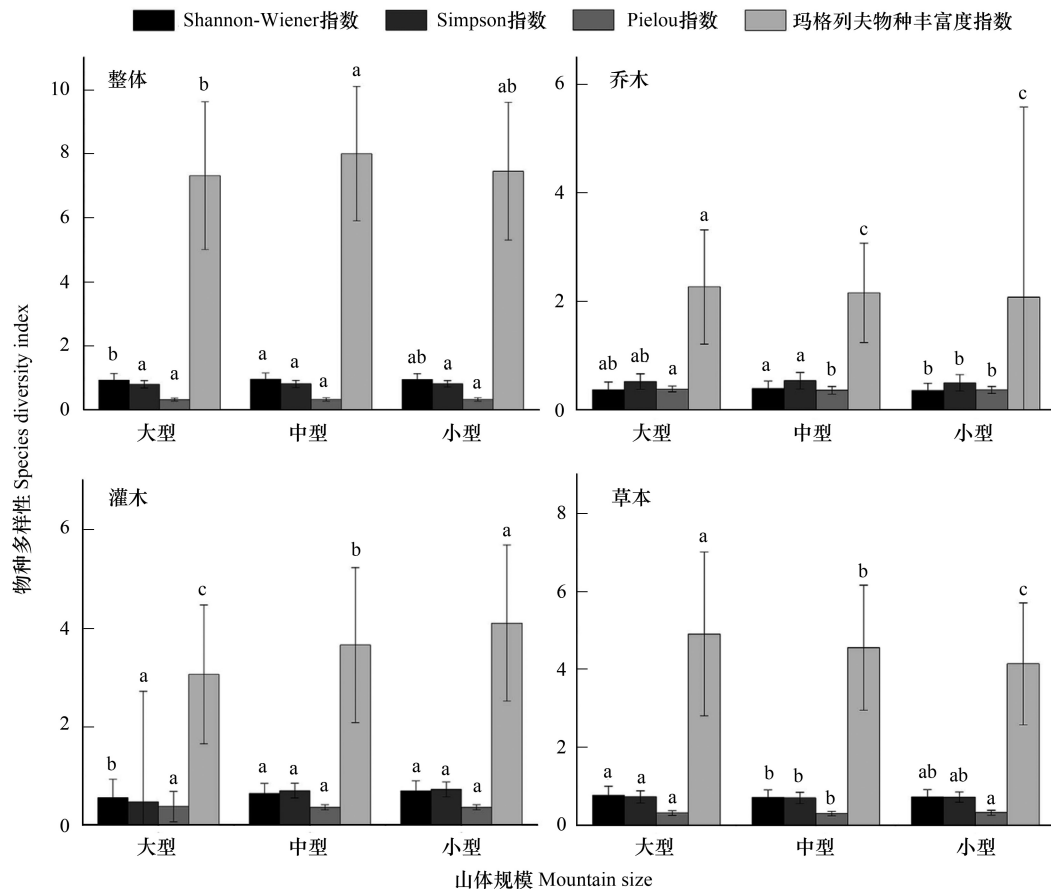


图2 不同规模城市遗存山体植物多样性指数差异性分析

Fig.2 Differential analysis on plant diversity indices of different size URM

图中同一指标的相同字母表示无显著差异 ( $P < 0.05$ ) ; 不同字母表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ )

大型、中型、小型城市遗存山体整体植物多样性分别在 1400 m、1600 m、100 m 缓冲区径向尺度产生了最明显的相关关系,并均呈显著正相关。各多样性指数随缓冲区 PTIA 的增加而增加(图 3)。

大型城市遗存山体乔木层和灌木层多样性分别与 1500 m 和 100 m 缓冲区范围内 PTIA 呈显著负相关和正相关;中型城市遗存山体乔木层、灌木层、草本层多样性分别与 900 m 缓冲区空间呈负相关、1700 m 缓冲区空间呈正相关、100 m 缓冲区空间呈负相关;小型城市遗存山体乔木多样性指数与 600 m 范围内 PTIA 呈显著正相关,大型城市遗存山体草本层、小型城市遗存山体灌木层和草本层均与缓冲区 PTIA 无显著相关关系。

### 2.2.2 植被覆盖度 (VC) 对城市遗存山体植物多样性的影响

图 4 结果可以看出,缓冲区 VC 在 2000 m 空间尺度范围内与大型、中型、小型城市遗存山体整体植物多样性无显著相关性。

不同规模城市遗存山体各层次植物多样性对缓冲区 VC 的空间响应存在明显差异。其中,大型城市遗存山体草本多样性与 VC 在 100 m 范围内呈显著负相关;中型城市遗存山体灌木多样性与 VC 在 300 m 范围内呈显著正相关;小型城市遗存山体乔木、灌木多样性分别与 VC 在 700 m 和 1800 m 范围内呈显著负相关。大型城市遗存山体乔木、灌木,中型城市遗存山体乔木、草本与小型城市遗存山体草本多样性与 VC 在 2000 m 范围内无显著相关性)。

### 2.2.3 景观破碎度 (FI) 对城市遗存山体整体植物多样性与各层次植物多样性的影响

图5结果显示,缓冲区景观破碎度指数 (FI) 与大型、中型城市遗存山体整体植物多样性无显著相关关

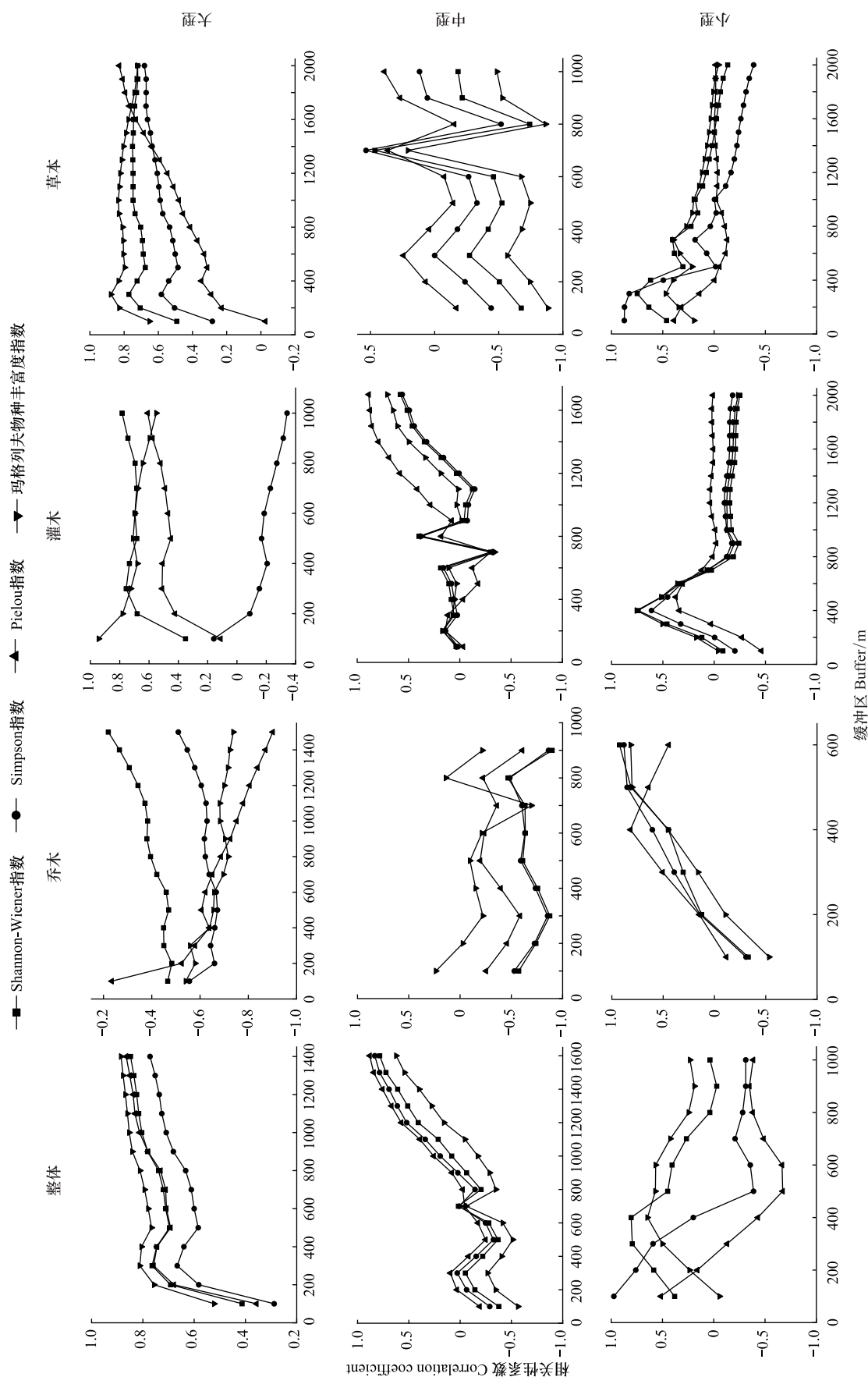


图3 不透水面积占比(PTIA)与城市遗存山体各层次植物多样性相关性分析  
Fig.3 Correlation analysis between the proportion of total impermeable area and each level plant diversity indices of URMs

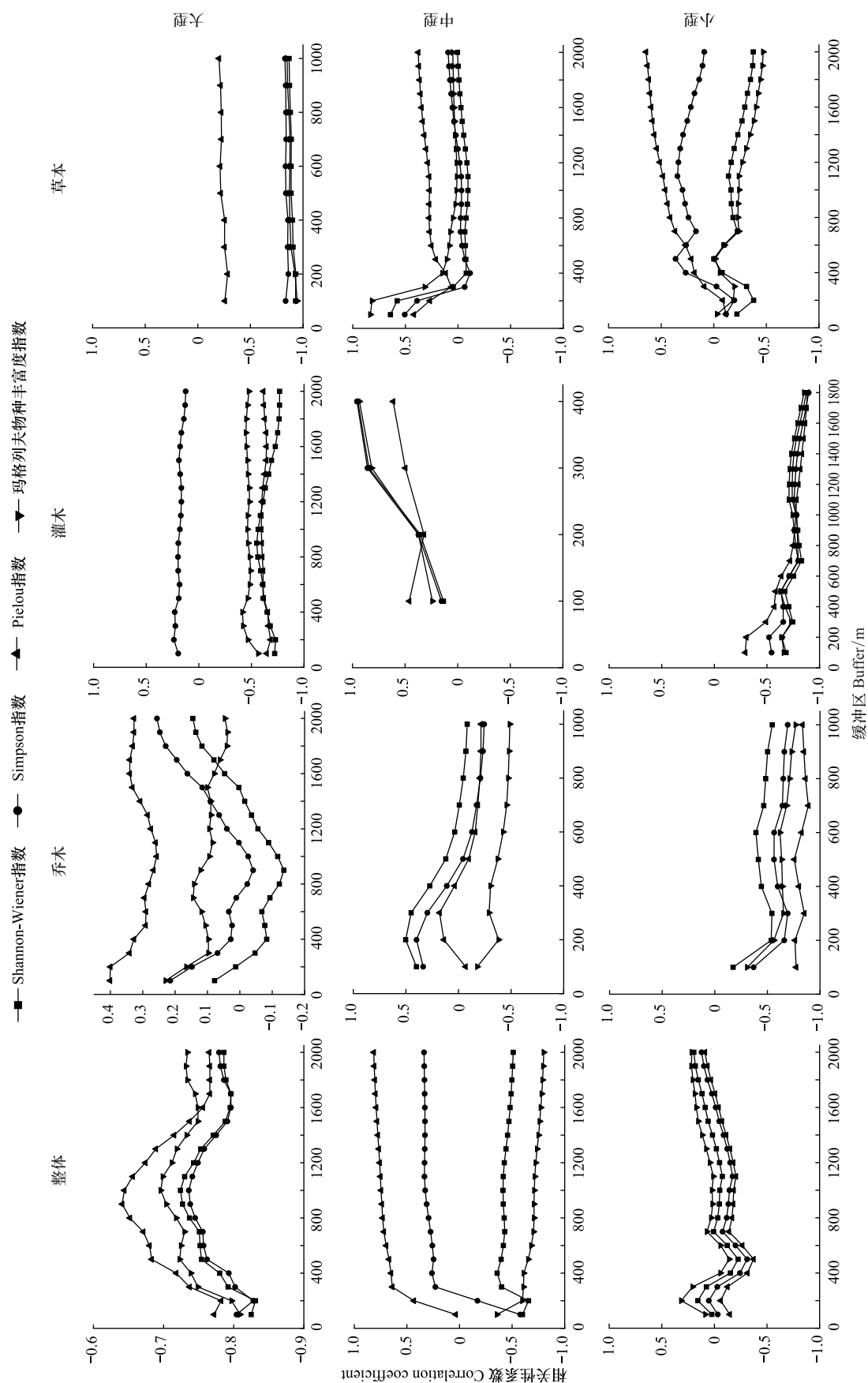


图4 植被覆盖度与城市遗存山体各层次植物多样性相关性分析  
Fig.4 Correlation analysis between vegetation coverage and each level plant diversity indices of URMs

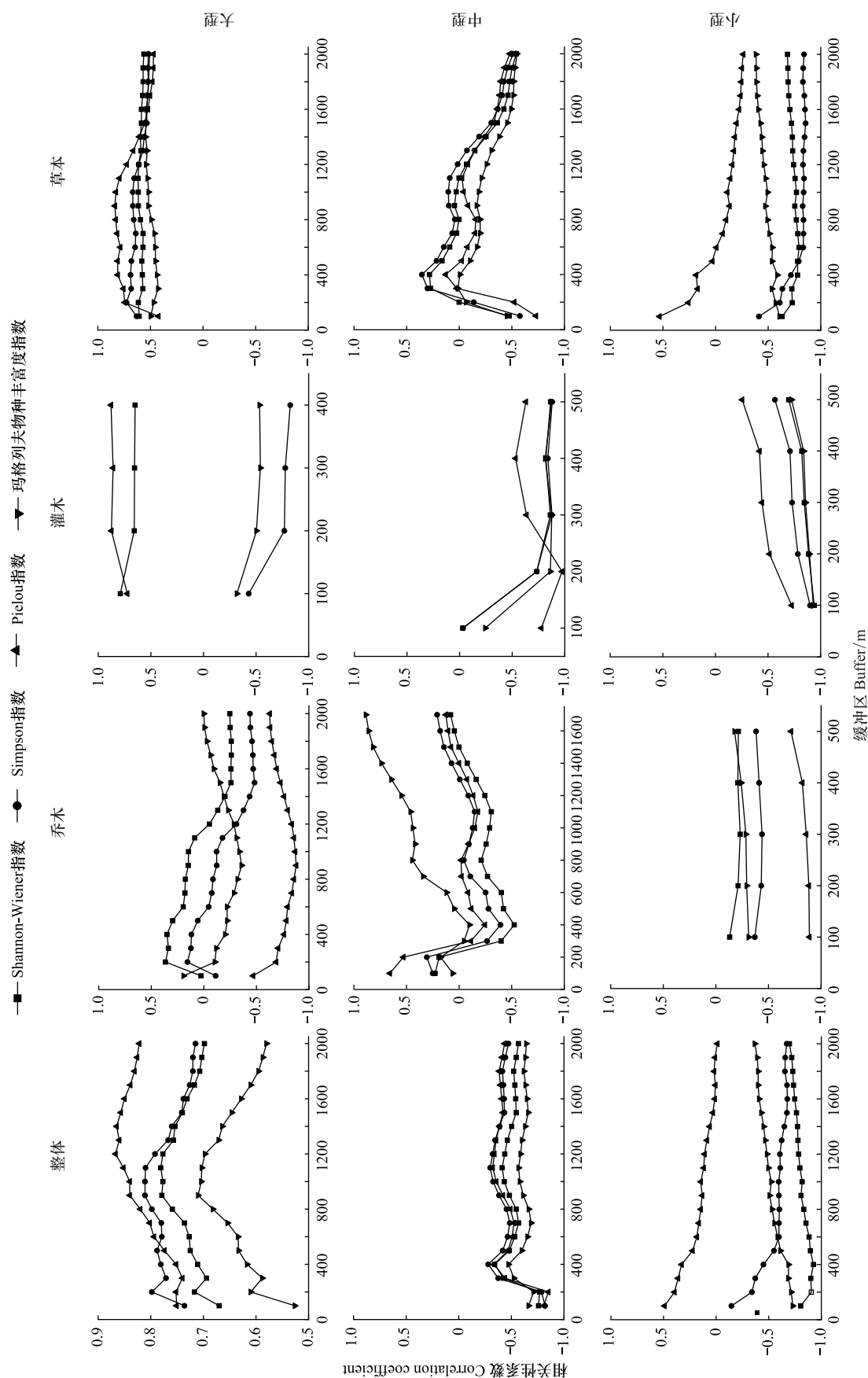


图5 景观破碎度与城市遗存山体各层次植物多样性相关性分析  
Fig.5 Correlation analysis between fragmentation index and each level plant diversity indices of URMs

系,但与小型城市遗存山体整体植物多样性在 200 m 空间范围内呈显著负相关。不同规模城市遗存山体各层次植物多样性对缓冲区景观破碎度指数的空间尺度响应规律表现出差异性。大型城市遗存山体灌木多样性与景观破碎度指数在 400 m 范围内呈显著正相关;中型城市遗存山体乔木多样性与景观破碎度指数在 1600 m 范围内呈显著正相关,灌木多样性与景观破碎度指数在 200 m 范围内呈显著负相关;小型城市遗存山体乔木、灌木多样性均与景观破碎度指数在 100 m 范围内呈显著负相关;大型城市遗存山体乔木和草本以及中型、小型城市遗存山体草本多样性均与景观破碎度指数在 2000 m 范围内无显著相关。

#### 2.2.4 土地利用(LU)对城市遗存山体植物多样性的影响

大型城市遗存山体整体植物多样性与居住用地(R)呈显著正相关;中型城市遗存山体整体植物多样性与公共管理与公共服务设施用地(A)、城市绿地(G)、耕地(E21)、水域(E1)等土地利用类型呈显著负相关;小型城市遗存山体整体植物多样性与未利用地(E32)呈显著负相关(图 6)。

不同规模城市遗存山体各层次植物多样性对土地利用类型的响应不尽相同。大型城市遗存山体乔木多样性与居住用地(R)、水域(E1)、草地(E31)等三类土地利用类型呈显著负相关,灌木多样性与水域(E1)呈显著负相关,草本多样性与城市绿地(G)、水域(E1)呈显著正相关,与耕地(E21)和林地(E22)呈显著负相关;中型城市遗存山体乔木多样性与工业用地(M)呈显著负相关,灌木多样性与林地(E22)呈显著正相关,与公共管理与公共服务设施用地(A)、水域(E1)呈显著负相关,草本多样性与土地利用类型无显著性相关;小型城市遗存山体乔木、灌木多样性与未地利用(E32)呈显著正相关,草本多样性与山体(EG)、未利用地(E32)呈显著负相关(图 6)。

#### 2.2.5 城市基质特征指标与城市遗存山体植物多样性指标的回归分析

因 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )指数既包含物种数,又包含各种间个体分配的均匀<sup>[29]</sup>,且与其它 3 个多样性指数在大多数相关分析中表现出相同或相近的状态,本研究选择各植物群落层次 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )指数作为因变量,通过共线性检验后,以 PTIA、FI、VC、LU 4 个指标为自变量,进行线性回归分析,结果表明在各缓冲区尺度下各种因变量组合的多元线性回归  $R^2$  均接近 0。以各城市基质特征指标分别与各植物群落层次 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )指数作为因变量,在相关性显著的尺度上进行一元线性回归模拟后所得各  $R^2$  值如图 7、图 8 所示。

从图 7 可以看出城市基质的不透水表面占比对大型和中型山体植物整体多样性指数具有较好的拟合优度,而对小型山体植物整体多样性指数的拟合优度较差,景观破碎化指数只对小型山体有高的拟合优度,而缓冲区土地利用类型对 3 个规模的城市遗存山体整体植物多样性都具有高的拟合度( $R^2$  大于等于 0.8)。从图 8 可以看出土地利用对各规模城市遗存山体不同层次植物 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )除中型山体外,都具有较高的拟合度;不透水表面占比、植被覆盖度和景观破碎化几个指标只与与之相关的几个山体类型的不同层次植物多生指数具有较好的拟合度。

### 3 讨论

#### 3.1 城市遗存山体规模与其植物群落物种组成与多样性

物种数量与生境面积之间的关系是生物地理学和生态学经久不衰的研究热点之一。一般而言,物种多样性随着斑块面积增加而增加,但由于受到城市环境中人类活动的直接或间接影响,城市残留斑块可能会有所不同<sup>[12]</sup>。本研究结果显示,虽然斑块面积是解释城市遗存山体整体植物多样性与各层次植物多样性的因素之一,但线性关系较弱,不同规模城市遗存山体植物群落物种组成与结构差异不明显,中型城市遗存山体能够维持更高的整体植物多样性。从植物物种来源中可以看出小型山体的外来物种数量最高,从乡土物种与外来物种的比值来看,中型山体(2.11)高于大型山体(1.73)和小型山体(1.64)。外来物种的数量在一定程度上可以反映出群落受干扰的程度<sup>[29]</sup>,总体来看城市遗存山体的外来物种数量已相当高,说明城市遗存山体植物群落受干扰程度较高。但外来物种来源方式和途径多种多样<sup>[30]</sup>,城市遗存山体的外来物种中哪些是镶嵌入

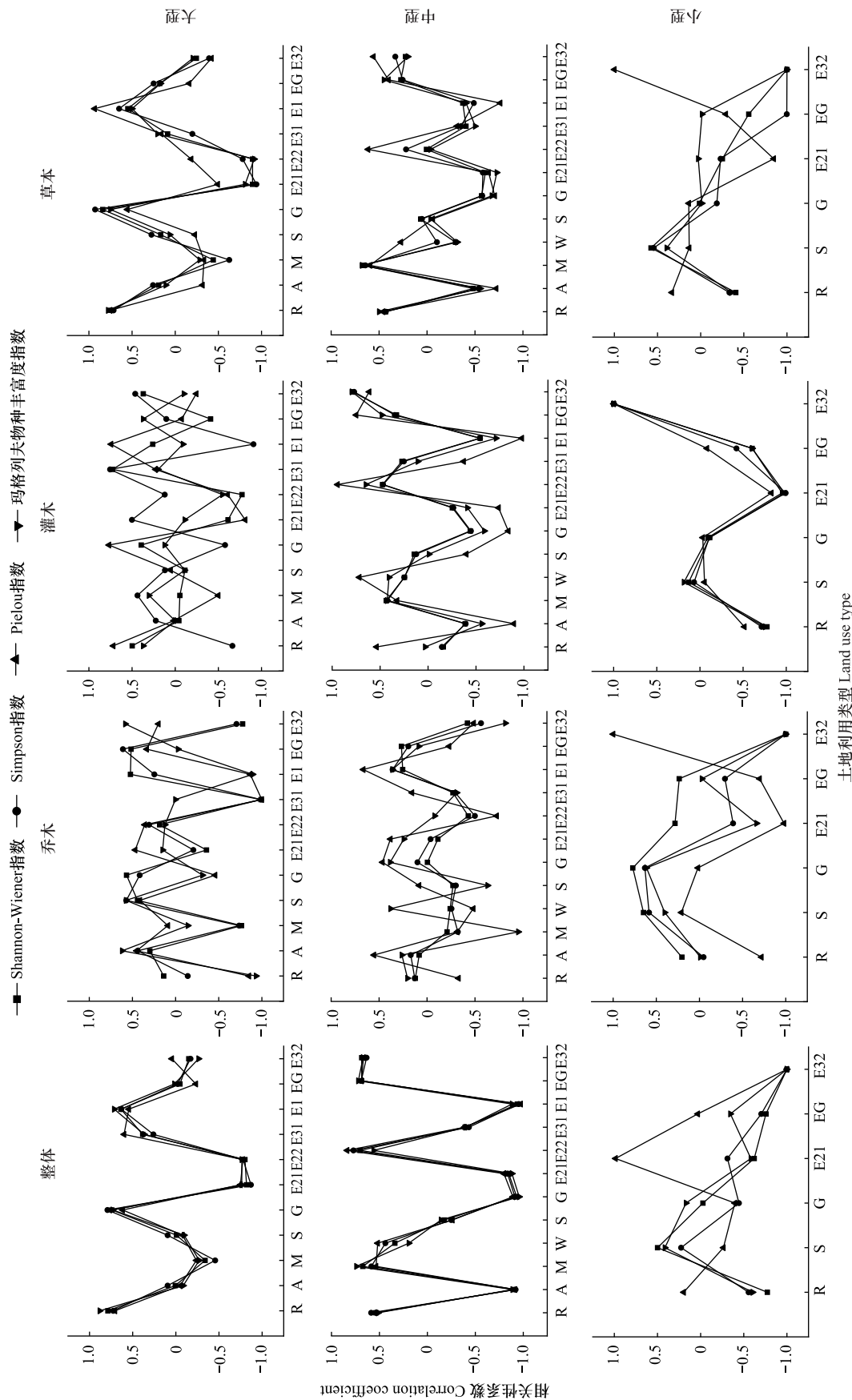


图 6 土地利用与城市遗存山体各层次植物多样性相关性分析  
Fig.6 Correlation analysis between land use and each level plant diversity indices of URMIs

R: 居住用地 Residential land; A: 公共管理与公共服务用地 Public management and public service land; B: 商业服务设施用地 Land for commercial service facilities; M: 工业用地 Industrial land; W: 物流仓储用地 Land for logistics and warehousing; S: 交通设施用地 Land for transportation facilities; U: 公共设施用地 Public facility land; G: 绿地 Green space; E21: 耕地 Arable land; E22: 林地 Woodland; E31: 草地 Grass; E1: 水域 Waters; EGE: 自然山体 Natural mountain; E32: 未利用地 Unused land

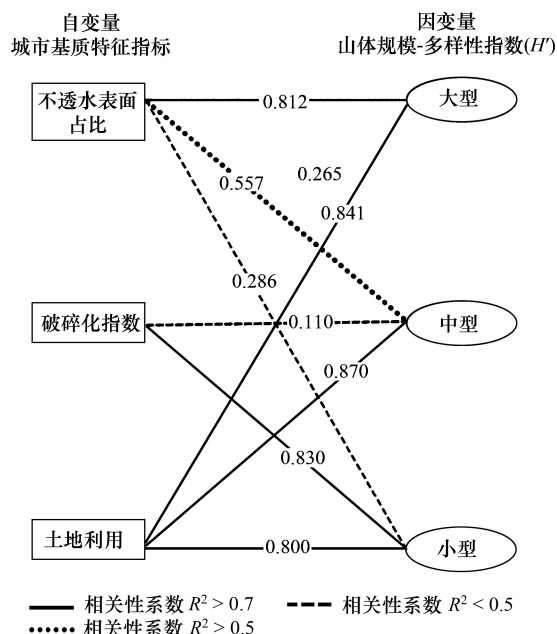


图 7 山体植物整体多样性指数线性回归模拟分析

Fig.7 Linear regression simulation analysis of overall plant diversity index of URMs

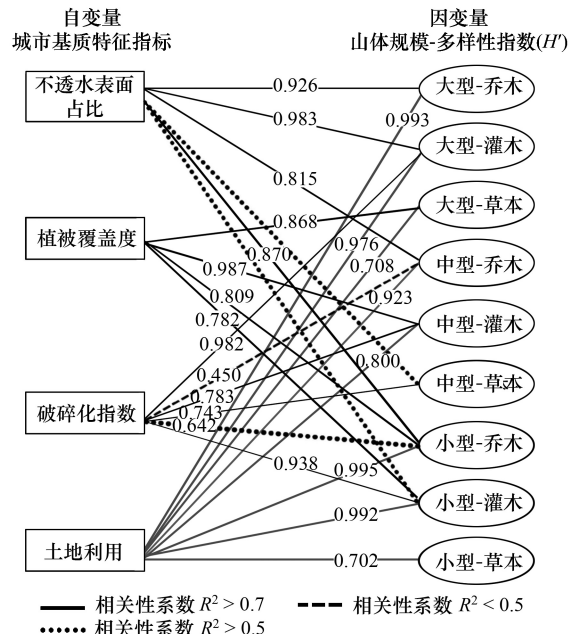


图 8 山体植物不同层次多样性指数线性回归模拟分析

Fig.8 Linear regression simulation analysis of different level plant diversity index of URMs

城后因城市干扰而迁入的,目前无法确定。通过与城外自然背景中的山体、以及不同时间镶嵌入城市的城市遗存山体进行对比研究,可能有利于揭示城市环境中各种人为活动干扰对城市遗存山体植物物种组成的影响。

在植物层次上,大型城市遗存山体能够维持较高的乔木、草本多样性,小型城市遗存山体则表现出较高的灌木多样性。城市人工环境具有人为因素持续、反复干扰的特点<sup>[31]</sup>。在以人为主导的城市基质环境中,残余生境物种多样性的维持与生态过程更大程度上取决于人类活动干扰类型、程度和频度<sup>[31]</sup>,而不同规模的山体对人类活动干扰的响应程度不同,相同的干扰对于大型山体可能属于轻度干扰,中等规模的山体属于中度干扰,对于小型山体则属于重度干扰,所以表现出中型城市遗存山体维持更高的整体植物多样性,从理论上符合中度干扰有利于维持较高的生物多样性,但这仍需要进行更深入的研究来验证。这种现象表明城市遗存山体植物群落物种多样性的复杂性和特殊性。城市遗存自然山体在形式上虽然类似于海岛生态岛屿,但城市基质是强烈的人工干扰场,各种不同类型的干扰对城市遗存山体植物群落产生或正面或负面的影响,因此城市遗存山体的植物多样性尤其是景观基底转变过程中造成的强烈人为干扰破坏极大程度上改变了斑块大小甚至是地形因子对残余生境物种多样性的相对影响<sup>[32]</sup>。因此,仅在斑块特征上考虑植物多样性模式不足以解释其他干扰因素的潜在影响。

### 3.2 城市基质特征与城市遗存山体植物多样性之间关系

多数学者选择不透水表面占比、植被覆盖度、景观破碎度和土地利用等指标做为城市基质特征指标分析城市生物多样性对城市化的响应,但目前没有一致的结论。已有学者证实了城市不透水表面积的增加会对城市植物物种多样性产生负面影响<sup>[26,33]</sup>。Planchuelo 等学者<sup>[34]</sup>在柏林城市化动态对濒危植物物种的影响研究也表明,随城市不透水表面的增加 36%的濒危植物种在 10 年内局部灭绝。而本研究结果显示,PTIA 在半径 100—1600 m 对 3 个规模城市遗存山体整体植物多样性均产生积极影响。此外,PTIA 在 100—1700 m 对不同规模城市遗存山体各层次植物多样性的影响则存在明显差异性(如大型、中型城市遗存山体乔木多样性与 PTIA 呈负相关,灌木则呈正相关),导致这种结果的原因可能有以下两个方面(1)城市遗存山体多被城市道

路网络与居住区包围,一定程度上更有利于植物繁殖体或花粉传播;(2)不同规模城市遗存山体都存在公园化利用、人为引种栽植园林观赏植物的现象(可能大部分为外来物种),并且为它们提供良好的生长环境与条件。

并不是所有城市基质因素都会对城市遗存山体植物群落物种多样性产生影响。本研究结果显示,植被覆盖度在缓冲区半径 2000 m 范围内与不同面积城市遗存山体整体植物多样性无显著相关性。进一步分析缓冲区植被覆盖度对城市遗存山体各层次植物多样性的潜在影响时发现,不同规模城市遗存山体部分层次的植物多样性对缓冲区 100—1800 m 范围内植被覆盖度的响应关系存在显著差异。有研究报道基质植被覆盖的组成和结构能够有效调节破碎化对残余生境生物多样性负面影响的作用<sup>[35—36]</sup>;也有研究表明,城市基质植被覆盖与邻里年龄存在二次关系,但 45 年左右才表现出显著正相关<sup>[37—38]</sup>。

城市景观破碎化对残余生境植物群落的影响具有多样性与复杂性,但不一定产生直接影响<sup>[41]</sup>。本研究发现,缓冲区景观破碎度对大型、中型城市遗存山体植物物种多样性没有显著影响,但在 200 m 范围内对小型城市遗存山体整体植物多样性产生负面影响,这可能是破碎化对残余生境植物多样性的影响存在时间上的时滞效应。通常面积较大、景观连通性较好并且拥有寿命较长的植物种的残余生境对破碎化影响的反应时间较长,而对小面积残余生境的影响较为迅速<sup>[36]</sup>。贵阳市城市化的快速扩张基本上从 20 年前开始,所以大型、中型城市遗存山体整体植物多样性将在何种程度与空间尺度上受到破碎化的影响目前并不清楚,需要在长期观察与记录后才能揭示出其影响规律。进一步分析景观破碎化对城市遗存各层次植物多样性的影响时发现,破碎化在 100—1600 m 与不同面积城市遗存山体乔木、灌木多样性存在相关性,但缓冲区破碎化与不同规模城市遗存山体草本植物多样性均无显著相关性。这说明不同面积残余生境与不同植物群落结构会对城市基质动态变化作出不同的反应。目前贵阳市正处于城市快速扩张与内部致密化阶段,长时间且持续不断的直接人为活动干扰使得该区域植被长期处于退化状态,并存在水土流失、土壤稀薄、岩石裸露等严重生态问题<sup>[39]</sup>。

不同土地利用类型及其配置所形成的景观结构可以显著塑造和调节植物群落组成与多样性<sup>[40]</sup>。本研究结果显示,缓冲区半径 100—1600 m 土地利用组成显著影响各规模城市遗存山体整体植物多样性与各层次植物多样性,但不同的土地利用类型对植物多样性的影响不同,居住、工业等土地利用类型可能对植物多样性产生积极影响,林地、耕地、草地等非建设用地类型反而可能产生负面影响,并且可能同时受到多个土地利用类型的协同影响。

综上,可以看出城市基质特征与城市遗存山体植物多样性之间关系复杂,不同的城市基质特征指标与遗存山体植物多样性相关关系具有空间尺度差异,因此无法拟合城市基质特征指标对城市遗存山体植物多样性影响的多元回归模型,而各基质特征各指标与城市遗存山体植物多样性之间的一元回归分析,在相关性尺度内大多数具有较好的拟合度。这也表明城市遗存山体周边的城市基质特征对其植物多样性会产生一定的影响,而影响的机制和作用路径非常复杂,需要更深入的研究。

### 3.3 研究不足与展望

本研究选择了城市不透水表面占比(PTIA)、植被覆盖度(VC)、景观破碎度(FI)和土地利用(LU)4个指标,对城市遗存山体植物多样性从整体到各结构层进行了相关性分析,初步表明城市基质对城市遗存山体植物多样性会产生一定的影响,且存在尺度效应,但并未揭示其作用机制。本研究选择的城市基质特征指标虽然在一定程度上能够反映城市环境特征,但这些指标都是二维基底上的指标,而城市环境与自然环境相比更为复杂且对残余生境有影响的可能是由建筑所形成三维指标,如缓冲区建筑高度、建筑体积容量等。城市中的高楼会改变残余生境的光环境,城市遗存山体的南坡可能因建筑遮挡由镶嵌入城前的阳坡变为阴坡,还有局部小气候环境的改变都会对城市遗存山体植物多样性和生态过程的维持产生更为直接的影响。另外,本研究只选择了 $\alpha$ 多样性指数分析了城市遗存山体植物多样性与城市基质特征之间的关系,虽然研究结果也反映出了二者之间的相关关系,而城市环境对各类人工干扰对城市遗存山体的影响可能从局部开始产生作用,从而会形成城市遗存山体植物多样性的空间异质性的变化,所以加入 $\beta$ 多样性指数可能更有利于揭示城市基

质对遗存山体植物多样性的影响机制。其次,多度分布比单个统计量如物种丰富度或者其他多样性指数包含更多的信息<sup>[29]</sup>,开展城市遗存山体中大量的外来物种的多度分布检验对于解释城市基质干扰作用更有意义。

快速城市化背景下,多山地区城市扩展过程中,大量自然山体被镶嵌入城市人工环境之中,形成城在山间,山在城中的特殊的景观镶嵌体,遗存于建成环境中的城市遗存山体成为人工基质中的生态孤岛,为在高强度人工环境背景下开展残余生境生态学相关研究,丰富岛屿生物地理学理论、中度干扰理论以及中性理论等生态学相关理论提供了理想的实验场所。城市是复杂的自然-社会复合系统<sup>[35]</sup>,城市遗存山体生境将长期受到各种复杂多样的、直接和间接的干扰<sup>[41-42]</sup>,如何维持城市遗存山体植物群落的稳定性既是一个理论问题,又是一个关系到城市生态环境保护与建设的现实问题。选择合适的样山,建立永久性固定样地长期观察和调查,揭示城市干扰场中城市遗存山体生境生态过程演变规律,具有非常重要的生态学意义。另外,城市遗存自然山体保留了大量原有植被,基于山体突起于地表的三维绿地特征,开展城市遗存山体景感生态学、城市高层人居环境绿视感知等相关研究,对于新时期城市高质量发展要求下的城市生态环境建设和人居环境建设都具有重要的理论和现实意义。

#### 4 结论

本研究以典型的多山城市为研究区,选择大、中、小不同规模的城市遗存山体为样山,通过样地调查结合景观格局分析,初步分析了城市遗存山体植物多样性与城市基质特征之间的相关关系。研究得出如下初步结论:除灌木层的群落物种数随山体规模增加而略有减少外,其他植物层次及整体植物物种数并未表现出一定物种-面积变化规律;但3个规模的城市遗存山体植物物种多样性指数具有显著差异,城市遗存山体整体植物多样性存在显著性差异,表现为中型>小型>大型;各层次植物多样性也存在显著性差异,乔木层、草本层多样性呈现出大型>中型>小型的趋势;灌木层多样性呈现出小型>中型>大型的趋势。城市基质特征与城市遗存山体植物多样性之间存在相关关系,因各基质特征指标与城市遗存山体植物多样性的相关关系存在尺度上的差异性,城市基质特征指标与城市植物多样性的 Shannon-Wiener 指数( $H'$ )只存在各自的一元线性回归关系,而无多元回归拟合关系。城市基质特征不仅表现为复杂的物理属性特征,更有错综复杂的人为活动特征,各种城市人工干扰因素均有可能对城市遗存山体生态系统产生影响,这些影响之间可能存在相互叠加、抵消等关系,所以城市人工干扰场中的城市遗存山体生态过程较之于其它残余生境的研究更具复杂性的挑战性,需从不同角度开展大量深入的研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Ramalho C E, Laliberté E, Poot P, Hobbs R J. Complex effects of fragmentation on remnant woodland plant communities of a rapidly urbanizing biodiversity hotspot. *Ecology*, 2014, 95(9): 2466-2478.
- [2] Esbah H, Cook E A, Ewan J. Effects of increasing urbanization on the ecological integrity of open space preserves. *Environmental Management*, 2009, 43(5): 846-862.
- [3] Fernández I C, Wu J G, Simonetti J A. The urban matrix matters: Quantifying the effects of surrounding urban vegetation on natural habitat remnants in Santiago de Chile. *Landscape and Urban Planning*, 2019, 187: 181-190.
- [4] 韩会庆,刘悦,蔡广鹏,白玉梅,马淑亮,陈思盈,罗瑞尧.快速城镇化背景下山地城市生态系统服务价值变化梯度特征——以贵阳市为例. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 295-303.
- [5] Müller A, Bøcher P K, Svenning J C. Where are the wilder parts of anthropogenic landscapes? A mapping case study for Denmark. *Landscape and Urban Planning*, 2015, 144: 90-102.
- [6] Fahrig L. Effects of habitat fragmentation on biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2003, 34: 487-515.
- [7] Kowarik I, Von Der Lippe M. Plant population success across urban ecosystems: a framework to inform biodiversity conservation in cities. *Journal of Applied Ecology*, 2018, 55(5): 2354-2361.
- [8] McKinney M L. Urbanization as a major cause of biotic homogenization. *Biological Conservation*, 2006, 127(3): 247-260.
- [9] De Araújo M L V S, Bernard E. Green remnants are hotspots for bat activity in a large Brazilian urban area. *Urban Ecosystems*, 2016, 19(1): 287-296.
- [10] Alvey A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2006, 5(4): 195-201.

- [11] Chimaimba F B, Kafumbata D, Chanyenga T, Chiotha S. Urban tree species composition and diversity in ZOMBA city, MALAWI: does land use type matter? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2020, 54: 126781.
- [12] Guirado M, Pino J, Rodà F. Understorey plant species richness and composition in metropolitan forest archipelagos: effects of forest size, adjacent land use and distance to the edge. *Global Ecology and Biogeography*, 2006, 15(1): 50-62.
- [13] Ramalho C E, Hobbs R J. Time for a change: dynamic urban ecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 2012, 27(3): 179-188.
- [14] 何荣晓, 杨帆, 闫蓬勃, 梁怀月. 城市土地利用对植物多样性的影响——以海口市为例. *中国城市林业*, 2019, 17(4): 12-17.
- [15] Patarkalashvili T K. Urban forests and green spaces of Tbilisi and ecological problems of the city. *Annals of Agrarian Science*, 2017, 15(2): 187-191.
- [16] 史芳宁, 刘世梁, 安毅, 孙永秀, 董世魁, 武雪. 城市化背景下景观破碎化及连接度动态变化研究——以昆明市为例. *生态学报*, 2020, 40(10): 3303-3314.
- [17] Kuras E R, Warren P S, Zinda J A, Aronson M F J, Cilliers S, Goddard M A, Nilon C H, Winkler R. Urban socioeconomic inequality and biodiversity often converge, but not always: a global meta-analysis. *Landscape and Urban Planning*, 2020, 198: 103799.
- [18] Malkinson D, Kopel D, Wittenberg L. From rural-urban gradients to patch-matrix frameworks: Plant diversity patterns in urban landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 169: 260-268.
- [19] Luck G W, Smallbone L T, O'Brien R. Socio-economics and vegetation change in urban ecosystems: patterns in space and time. *Ecosystems*, 2009, 12(4): 604-620.
- [20] Hope D, Gries C, Zhu W, Fagan W F, Redman C L, Grimm N B, Nelson A L, Martin C, Kinzig A. Socioeconomics drive urban plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2003, 100(15): 8788-8792.
- [21] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. *山地学报*, 2015, 33(6): 641-648.
- [22] 任梅, 包玉, 何立影. 喀斯特山地城市绿地景观格局研究——以安顺市为例. *山地农业生物学报*, 2018, 37(6): 54-62.
- [23] 张军以, 戴明宏, 王腊春, 苏维词, 曹立国. 西南喀斯特石漠化治理植物选择与生态适应性. *地球与环境*, 2015, 43(3): 269-278.
- [24] 母浩江, 崔文刚, 鲁霞. 典型喀斯特山地城市不透水面时空格局. *济南大学学报: 自然科学版*, 2021, 35(1): 34-40, 61.
- [25] 马克平, 黄建辉, 于顺利, 陈灵芝. 北京东灵山地区植物群落多样性的研究 II 丰富度、均匀度和物种多样性指数. *生态学报*, 1995, 15(3): 268-277.
- [26] Yan Z G, Teng M J, He W, Liu A Q, Li Y R, Wang P C. Impervious surface area is a key predictor for urban plant diversity in a city undergone rapid urbanization. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 335-342.
- [27] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [28] Yang J, Yan P B, He R X, Song X Q. Exploring land-use legacy effects on taxonomic and functional diversity of woody plants in a rapidly urbanizing landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 162: 92-103.
- [29] 马古兰 A E, 麦吉尔 B J. 生物多样性——测量与评估前沿. 韩博平, 官昭瑛, 杨阳, 译. 北京: 科学出版社, 2019.
- [30] 彭羽, 王玖涛, 卢奕瞳, 董吉会, 周艳秋, 尚佳欣, 李响, 米凯. 城市化景观格局对本土植物多样性的多尺度影响——以北京市顺义区为例. *应用生态学报*, 2020, 31(12): 4058-4066.
- [31] Hellegers M, Ozinga W A, Hinsberg Van A, Huijbregts M A J, Hennekens S M, Schaminée J H J, Dengler J, Schipper A M. Evaluating the ecological realism of plant species distribution models with ecological indicator values. *Ecography*, 2020, 43(1): 161-170.
- [32] Matlack G R. Sociological edge effects: Spatial distribution of human impact in suburban forest fragments. *Environmental Management*, 1993, 17(6): 829-835.
- [33] Peng Y, Mi K, Wang H T, Liu Z W, Lin Y Y, Sang W G, Cui Q T. Most suitable landscape patterns to preserve indigenous plant diversity affected by increasing urbanization: a case study of Shunyi District of Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2019, 38: 33-41.
- [34] Ruffell J, Clout M N, Didham R K. The matrix matters, but how should we manage it? Estimating the amount of high - quality matrix required to maintain biodiversity in fragmented landscapes. *Ecography*, 2017, 40: 171-178.
- [35] Brunbjerg A K, Hale J D, Bates A J, Fowler R E, Rosenfeld E J, Sadler J P. Can patterns of urban biodiversity be predicted using simple measures of green infrastructure? *Urban Forestry & Urban Greening*, 2018, 32: 143-153.
- [36] Planchuelo G, Kowarik I, Von Der Lippe M. Plant traits, biotopes and urbanization dynamics explain the survival of endangered urban plant populations. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(8): 1581-1592.
- [37] Grove J M, Troy A R, O'Neil-Dunne J P M, Burch Jr W R, Cadenasso M L, Pickett S T A. Characterization of households and its implications for the vegetation of urban ecosystems. *Ecosystems*, 2006, 9(4): 578-597.
- [38] Troy A R, Grove J M, O'Neil-Dunne J P M, Pickett S T A, Cadenasso M L. Predicting opportunities for greening and patterns of vegetation on private urban lands. *Environmental Management*, 2007, 40: 394-412.
- [39] 盛叶子, 曾蒙秀, 林德根, 彭海军, 朱丽东, 李凤全, 余奕泓, 王能静. 2000-2014 年人类活动对贵州省植被净初级生产力的影响. *中国岩溶*, 2020, 39(1): 62-70.
- [40] Walz U. Indicators to monitor the structural diversity of landscapes. *Ecological Modelling*, 2015, 295: 88-106.
- [41] 邢龙, 王志泰, 涂燕茹. 黔中喀斯特城市遗存山体景观格局时空演变——以安顺市为例. *生态学报*, 2021, 41(4): 1291-1302.
- [42] 向杏信, 黄宗胜, 王志泰. 喀斯特多山城市空间形态结构与植物群落物种多样性的耦合关系——以安顺市为例. *生态学报*, 2021, 41(2): 575-587.